

МУЛЬТИКАСКАДНЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ БИНАРНЫЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ: УТИЛИЗАЦИЯ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ (120°C)¹

© 2022 г. Г. В. Томаров^{a, *}, А. А. Шипков^{a, *}

^aООО “Геотерм-М”, ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия

*e-mail: geoatom.m@gmail.com

Поступила в редакцию 23.08.2021 г.

После доработки 16.10.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

По мере расширения масштабов сооружения энергоблоков с бинарным циклом ведется поиск новых технических решений, направленных на повышение эффективности бинарных технологий. С этой целью изучается в том числе и возможность применения мультикаскадных бинарных энергокомплексов (БЭК) на основе принципа инкрементального (пошагового) преобразования энергии геотермального теплоносителя. С учетом того что в мире преобладают низкотемпературные геотермальные ресурсы (до 60% всех геотермальных месторождений имеют температуру менее 130°C), оптимизационные расчетные исследования двух- и трехкаскадных БЭК были выполнены для исходного геотермального теплоносителя с температурой 120°C. Представлены результаты исследования влияния выбора органических низкокипящих веществ и значений температуры геотермальной среды в каскадах на достижение максимальной мощности и минимального удельного расхода геотермального теплоносителя. Выполнено сравнение технических характеристик двух- и трехкаскадных БЭК по сравнению с традиционным одноконтурным бинарным энергоблоком при использовании различных нетоксичных, пожаро- и взрывобезопасных органических веществ. Показано, что применение трехкаскадной схемы с R-600 во всех контурах и использование геотермального теплоносителя с температурой 120°C может обеспечить увеличение передаваемого в бинарный цикл тепла на 36.5% по сравнению с однокаскадной схемой. При этом в соответствии с ранее выполненными расчетами прирост передаваемого в бинарный цикл тепла при использовании геотермального теплоносителя с температурой 180°C составил 15.0%. Установлено, что минимальные значения удельного расхода геотермального теплоносителя с температурой 120°C (нетто и брутто) в трехкаскадной схеме достигаются при использовании в качестве рабочего тела первого, второго и третьего каскадов вещества R-600 и составляют 44.6 и 42.7 (кг/с)/МВт соответственно. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании мультикаскадных бинарных энергокомплексов с температурой геотермального теплоносителя 120°C.

Ключевые слова: геотермальный низкотемпературный теплоноситель, бинарные энергоблоки, органическое рабочее тело, мультикаскадные энергокомплексы, удельный расход, мощность

DOI: 10.1134/S004036362205006X

Одним из перспективных направлений развития современной геотермальной энергетики является расширение используемой ресурсной базы на основе вовлечения низкотемпературных источников в электрогенерацию. С этой целью применяются бинарные энергоустановки с низкокипящим рабочим телом, предназначенные для преобразования тепловой энергии низкотемпературного геотермального теплоносителя в электрическую. На геотермальных электростанциях с комбинированным циклом, работающих на парогидротермах с относительно высокой темпера-

турой (140–300°C), наряду с паротурбинными энергоблоками для утилизации тепла сбросного сепарата применяются бинарные установки. Геотермальный теплоноситель с температурой около 120°C и ниже чаще напрямую используется в бинарных технологиях для производства электроэнергии.

По мере освоения и расширения масштабов практического использования низкотемпературных геотермальных источников улучшаются технико-экономические показатели и совершенствуются бинарные технологии. Интенсивные исследования и разработки в этой области в последние годы способствуют снижению стоимости электро-

¹ См. статью авторов, опубликованную в журнале “Теплоэнергетика” № 4 за 2022 г. С. 31–40. doi 10.1134/S0040363622030109.

энергии, производимой бинарными энергоблоками. В то же время относительно невысокий КПД бинарного органического цикла, в том числе из-за низкой температуры источника тепла, стимулирует поиск новых технических решений по повышению их эффективности.

В качестве одного из таких решений рассматривается возможность применения мультикаскадных БЭК на основе принципа инкрементального (пошагового) преобразования энергии геотермального теплоносителя [1, 2]. В таком энергокомплексе располагаемый теплоперепад срабатывается частями в турбинах последовательно расположенных каскадов. Оптимальный выбор органического рабочего тела, соответствующий температурному уровню геотермального теплоносителя каждого отдельного каскада, позволяет обеспечить повышение эффективности бинарного энергокомплекса в целом.

Данная статья является продолжением ранее опубликованных материалов, посвященных изучению влияния выбора рабочих тел на основные параметры технологического контура и технические характеристики мультикаскадных бинарных энергоблоков, работающих на геотермальном теплоносителе с температурой 180°C [3, 4]. В рамках выполненного комплекса расчетных оптимизационных исследований для различных вариантов использования однокомпонентных органических рабочих тел определялись мощность каждой из турбоустановок и блочно-каскадного энергокомплекса в целом, оптимальное давление в контурах и температура сепарата на выходе каждого цикла, обеспечивающие минимальный удельный расход геотермального сепарата на единицу вырабатываемой мощности, расход охлаждающей воды и др.

В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований двух- и трехкаскадных бинарных энергоблоков для температуры исходного геотермального теплоносителя 120°C, которая соответствует наиболее распространенному в мире температурному уровню геотермальных месторождений. В России такие геотермальные запасы имеются на Камчатке, Курильских островах, Северном Кавказе и в других регионах. Приводятся результаты, полученные при использовании в бинарных контурах различных комбинаций органических рабочих тел, относящихся к группе нетоксичных, пожаро- и взрывобезопасных как наиболее перспективных в части обеспечения благоприятных условий для безопасной и экологически чистой эксплуатации энергоблоков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В БИНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЕЙ

Ресурсная база современной геотермальной электроэнергетики представлена теплоносителем в виде воды, пароводяной смеси и перегретого пара с характерным диапазоном температур от 90 до 300°C и более. В мире преобладают низкотемпературные геотермальные ресурсы. Так, в США подавляющее большинство (70%) составляют геотермальные источники с температурой ниже 150°C. Температуру менее 130°C имеют 59% всех известных геотермальных источников в США [5]. Мировые геотермальные ресурсы распределяются по температуре аналогичным образом.

На протяжении нескольких десятилетий коммерческое освоение производства электроэнергии в основном осуществлялось с помощью геотермальных энергоблоков, работающих на перегретом и влажном паре с температурой выше 300°C. Энергопотенциал такого теплоносителя позволяет получать относительно высокие значения эффективности и единичной мощности геотермальных энергоблоков. По мере освоения ограниченных мировых запасов высокотемпературных месторождений в целях расширения ресурсной базы геотермальной энергетики получили развитие бинарные технологии, способные утилизировать также тепло низкотемпературного геотермального теплоносителя в виде горячей воды.

Принципиальное отличие бинарных энергоустановок с органическим низкокипящим рабочим телом от традиционных геотермальных электростанций с паровыми турбинами заключается в возможности их применения для производства электроэнергии на основе использования низкотемпературных источников тепла (от 70°C). Такие геотермальные ресурсы имеются в различных регионах России [6]. На рис. 1 представлены данные по количеству действовавших в мире на 2015 г. бинарных энергоустановок с использованием геотермального теплоносителя с разными температурами.

Физико-химические свойства органических низкокипящих рабочих тел существенно влияют на оптимальные значения основных параметров рабочей среды и технические характеристики бинарных энергоблоков и могут ограничивать возможности создания бинарных энергоблоков большой единичной мощности. Большинство бинарных установок в мире имеют единичную мощность от 5.0 до 50.0 МВт (рис. 2).

Средняя единичная мощность современных бинарных энергоблоков составляет 6.3 МВт [7]. За 10 лет суммарная установленная мощность геотермальных электростанций с бинарными энергоблоками в 25 странах увеличилась более чем на 50% и к 2015 г. достигла 1973 МВт.

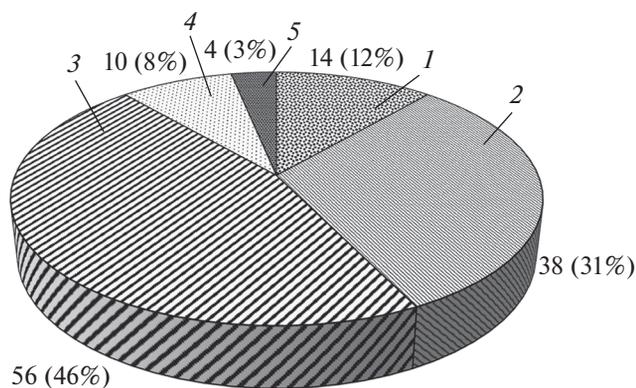


Рис. 1. Количество геотермальных бинарных энергоблоков, в которых используется теплоноситель с различными температурами. Температура теплоносителя, °С: 1 – менее 100; 2 – 100–150; 3 – 150–200; 4 – 200–250; 5 – более 250

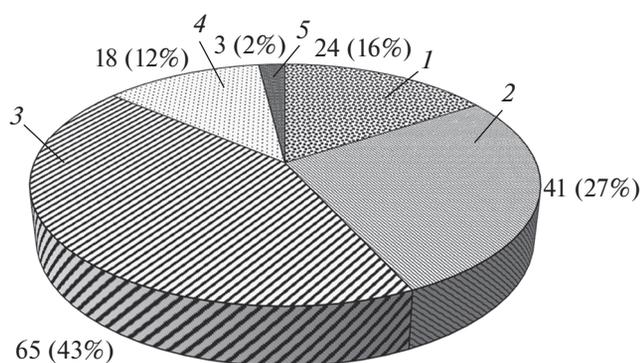


Рис. 2. Распределение геотермальных бинарных электростанций в мире по единичной установленной мощности. Единичная установленная мощность: 1 – менее 500 кВт; 2 – от 500 кВт до 5 МВт; 3 – от 5 до 25 МВт; 4 – от 25 до 50 МВт; 5 – более 50 МВт

Современный тренд в развитии экологически чистых технологий электрогенерации для получения “зеленого” водорода является дополнительным стимулом для выполнения работ по совершенствованию энергоустановок на органическом рабочем теле [8]. Одним из таких направлений может стать повышение эффективности бинарных технологий путем применения мультикаскадных бинарных энергокомплексов. Для этого целесообразно провести оптимизационные исследования по выбору рабочего тела для каждого отдельного энергоблока и их комбинации в нескольких последовательных каскадах.

С учетом того что высокотемпературные геотермальные источники в мире в основном уже освоены, а значительная часть ресурсов геотермального тепла имеет температуры менее 130°С, в

рамках оптимизационных исследований мультикаскадных геотермальных комплексов были выполнены расчеты для исходного геотермального теплоносителя с температурой 120°С.

ПОДВОД ТЕПЛА ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РАБОЧИЕ ЦИКЛЫ МУЛЬТИКАСКАДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Основные допущения расчетного моделирования параметров и характеристик рабочих контуров двух- и трехкаскадных БЭК при проведении оптимизационных исследований представлены в [3, 4]. Базовое условие выполнения расчетов заключается в том, что удельный расход геотермального теплоносителя определялся из условия обеспечения на клеммах генератора мощности равной 10 МВт в одноконтурном бинарном энергоблоке на наименее эффективном рабочем теле. В расчетах гидравлические потери не учитывались, минимальные температурные напоры в теплообменном оборудовании принимались равными 10°С, перегрев пара за испарителем – 3°С, температура охлаждающей воды – 10°С.

Исследования процессов теплообмена в технологических контурах одно-, двух- и трехкаскадных БЭК были выполнены при участии специалистов ОИВТ РАН и поддержке Минобрнауки РФ. Результаты расчета влияния количества тепла геотермального теплоносителя, передаваемого через парогенератор в бинарные контуры, на значения температуры геотермального флюида и рабочего тела представлялись в виде t, Q -диаграммы.

В качестве примера на рис. 3 показана расчетная t, Q -диаграмма передачи тепла в теплообменниках при использовании низкотоксичных, пожаро- и взрывоопасных R-600 и циклобутана C_4H_8 в первом и втором контуре двухкаскадного энергокомплекса соответственно. Важной характеристикой, в значительной степени определяющей проектные параметры теплообменного оборудования, является минимальный температурный напор между греющим и подогреваемым теплоносителями. Значение этой величины задавалось авторами при моделировании постоянным для всех рассмотренных рабочих тел, однако для более детальной оптимизации могут использоваться численные методы оценки, например [9].

Использование в двухкаскадной схеме R-600 и C_4H_8 позволяет, по сравнению с однокаскадной схемой, существенно увеличить количество передаваемого в бинарный цикл тепла (на 24%) и снизить температуру геотермального теплоносителя на выходе бинарной установки с 69.5 до 57.3°С (см. рис. 3). Так, применение двухкаскадной схемы при температуре исходного теплоносителя

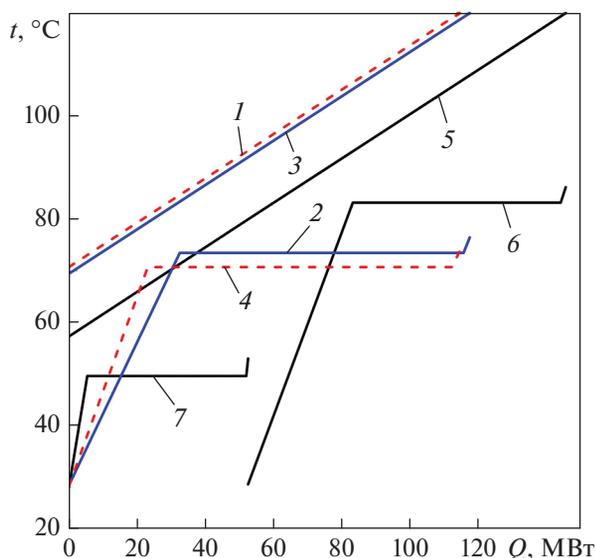


Рис. 3. t, Q -диаграмма теплообменников одно- (кривые 1, 2, 3 и 4) и двухкаскадной (кривые 5, 6 и 7) схемы утилизации тепла геотермального теплоносителя с использованием R-600 и циклобутана C_4H_8 в качестве рабочих тел первого и второго каскада соответственно.

Теплоноситель: 1, 3, 5 – геотермальный; 2 – R-600; 4 – циклобутан C_4H_8 ; 6 – R-600 в первом каскаде двухкаскадной схемы; 7 – циклобутан C_4H_8 во втором каскаде двухкаскадной схемы

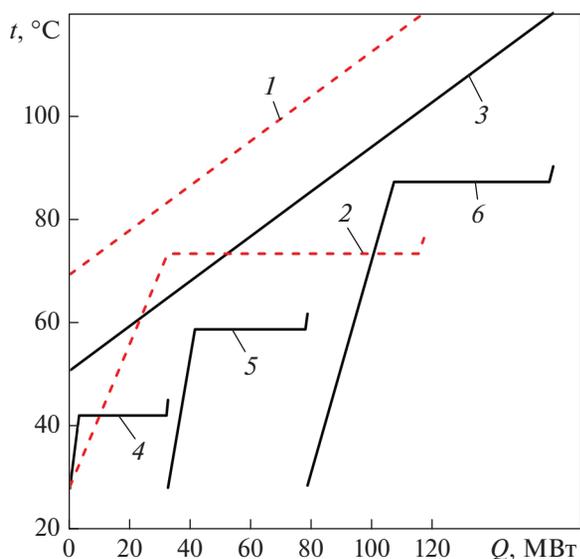


Рис. 4. t, Q -диаграмма теплообменников одно- (кривые 1, 2) и трехкаскадной (кривые 3, 4, 5 и 6) схемы утилизации тепла геотермального теплоносителя с использованием R-600 в качестве рабочего тела первого, второго и третьего каскадов трехкаскадной схемы и рабочего тела однокаскадной бинарной энергоустановки.

Теплоноситель: 1, 3 – геотермальный; 2 – R-600; 4 – R-3110 в первом каскаде трехкаскадной схемы; 5 – R-600 во втором каскаде трехкаскадной схемы; 6 – R-600 во третьем каскаде трехкаскадной схемы

$180^\circ C$ дает возможность увеличить количество тепла, передаваемого в бинарный цикл, по сравнению с однокаскадной схемой, только на 15% [3].

Использование в качестве рабочего тела R-600 во всех трех контурах трехкаскадной схемы позволяет, по сравнению с однокаскадной схемой, увеличить количество передаваемого в бинарный цикл тепла на 36.5% и снизить температуру геотермального теплоносителя на выходе бинарной установки с 69.5 до $50.9^\circ C$ (см. рис. 3). На рис. 4 показана расчетная t, Q -диаграмма передачи тепла в теплообменниках при использовании нетоксичного, пожаро- и взрывоопасного n -бутана. Согласно результатам ранее опубликованных исследований [3], применение трехкаскадной схемы (в первом и втором каскадах блочно-каскадного энергокомплекса использовался RC-270, в третьем – R-601a) при температуре исходного теплоносителя $180^\circ C$ позволяет увеличить количество тепла, передаваемого в бинарный цикл, по сравнению с однокаскадной схемой, на 19% и снизить температуру геотермального теплоносителя на выходе бинарной установки до $48.6^\circ C$.

Полученные результаты показывают, что в зависимости от выбора рабочих тел в бинарных контурах и конфигурации тепловой схемы эффективность утилизации сепарата, индикатором которой является увеличение количества передаваемого тепла от геотермального теплоносителя в бинарный цикл, может быть существенно различной.

ОПТИМИЗАЦИЯ МУЛЬТИКАСКАДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО ИХ МОЩНОСТИ И УДЕЛЬНОМУ РАСХОДУ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В рамках комплексных исследований при использовании различных комбинаций выбранных рабочих тел в бинарных контурах было изучено влияние температуры геотермального теплоносителя на выходе из первого (для двухкаскадной схемы) и второго (для трехкаскадной схемы) каскадов на значения мощности (брутто и нетто) и собственных нужд, а также на удельный расход исходного геотермального флюида с температурой $120^\circ C$. Расчеты показали, что при использовании различных нетоксичных, пожаро- и взрывобезопасных органических веществ в двухкаскадной схеме наименьшее значение удельного расхода (нетто) геотермального теплоносителя на входе в установку, равное 48.2 (кг/с)/MWt, достигается при его температуре на выходе из первого каскада около $62^\circ C$, когда в первом и втором каскаде применяются органические вещества R-3110 и C_7F_{16} соответственно (рис. 5). При этом расчеты показали, что минимальные значения удельного расхода геотермального теплоносителя с температурой $120^\circ C$ (нетто и брутто) в трехкаскадной

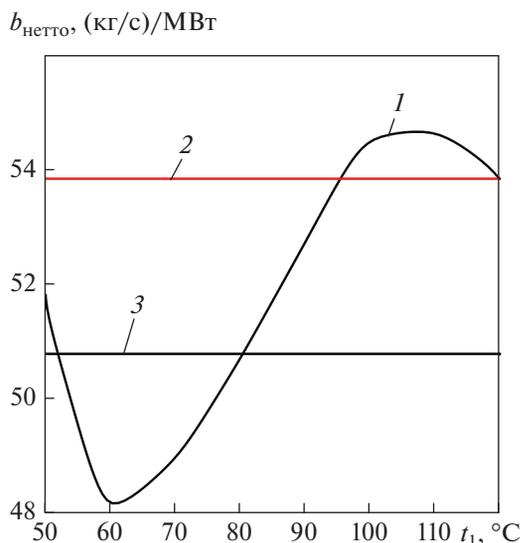


Рис. 5. Зависимость удельного расхода (нетто) $b_{\text{нетто}}$ геотермального теплоносителя (ГТН) с температурой 120°C от его температуры на выходе из первого каскада блочно-каскадного энергокомплекса t_1 при использовании в качестве рабочего тела в первом и втором контуре веществ R-3110 и C₇F₁₆ соответственно. Расход: 1 – в двухкаскадной схеме; 2 – минимальный возможный удельный расход в однокаскадной схеме, достигаемый при использовании в качестве рабочего тела C₇F₁₆; 3 – минимальный возможный удельный расход в однокаскадной схеме, достигаемый при использовании в качестве рабочего тела R-3110

схеме бинарного энергокомплекса достигаются при использовании R-600 в качестве рабочего тела первого, второго и третьего каскада и составляют 44.6 и 42.7 (кг/с)/МВт соответственно.

Расчетные зависимости мощности от температуры геотермального теплоносителя для такого двухкаскадного бинарного энергоблока представлены на рис. 6. С ростом температуры на выходе из первого каскада наблюдается увеличение мощности (брутто) второго контура. При этом значение мощности (брутто) первого контура имеет максимум (11.8 МВт) при температуре около 57°C и затем с ее ростом снижается. В результате наибольшую суммарную мощность (12.5 МВт) двухкаскадный энергоблок достигает при температуре геотермального теплоносителя 62°C на выходе из первого каскада. Из-за низкой плотности и относительно небольшого давления органического рабочего тела R-3110 мощность питательных насосов первого каскада значительно меньше, чем второго.

При исходной температуре геотермального теплоносителя 120°C и использовании нетоксичных, пожаро- и взрывобезопасных органических веществ в трехкаскадной схеме (в первом, втором и третьем каскаде используется R-3110) опти-

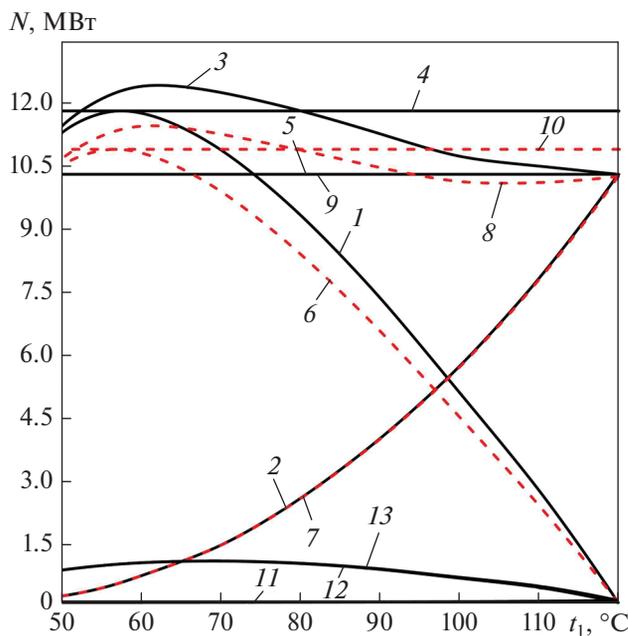


Рис. 6. Зависимость мощности брутто $N_{\text{брутто}}$ (кривые 1, 2, 3, 4 и 5), нетто $N_{\text{нетто}}$ (кривые 6, 7, 8, 9 и 10) и собственных нужд $N_{\text{с.н}}$ (кривые 11, 12 и 13) блочно-каскадного энергокомплекса, использующего тепло геотермального теплоносителя с температурой 120°C, от температуры теплоносителя на выходе из первого каскада t_1 бинарного энергоблока (БЭ) при применении в качестве рабочего тела в первом и втором каскаде веществ R-3110 и C₇F₁₆ соответственно.

1, 2 – $N_{\text{брутто}}$ турбин первого и второго каскадов БЭ; 3 – суммарная мощность брутто $\sum N_{\text{брутто}}$ двухкаскадного бинарного энергоблока; 4 – максимально возможная $N_{\text{брутто}}$ однокаскадного БЭ при использовании в качестве рабочего тела R-3110; 5 – максимально возможная $N_{\text{брутто}}$ однокаскадного БЭ при использовании в качестве рабочего тела C₇F₁₆; 6, 7 – $N_{\text{нетто}}$ турбин первого и второго каскадов бинарного энергоблока; 8 – суммарная мощность нетто $\sum N_{\text{нетто}}$ двухкаскадного БЭ; 9 – максимально возможная $N_{\text{нетто}}$ однокаскадного БЭ при использовании в качестве рабочего тела C₇F₁₆; 10 – максимально возможная $N_{\text{нетто}}$ однокаскадного БЭ при использовании в качестве рабочего тела R-3110; 11, 12 – мощности питательных насосов первого и второго каскадов двухкаскадного БЭ; 13 – $N_{\text{с.н}}$ двухкаскадного БЭ

мальное (для обеспечения наибольшей мощности энергокомплекса) значение температуры геотермального теплоносителя на выходе из второго контура составляет 55°C (при его температуре на выходе из первого каскада 65°C) (рис. 7).

На рис. 7 кривая 1 соответствует температуре на выходе из первого контура 100°C. При этом если

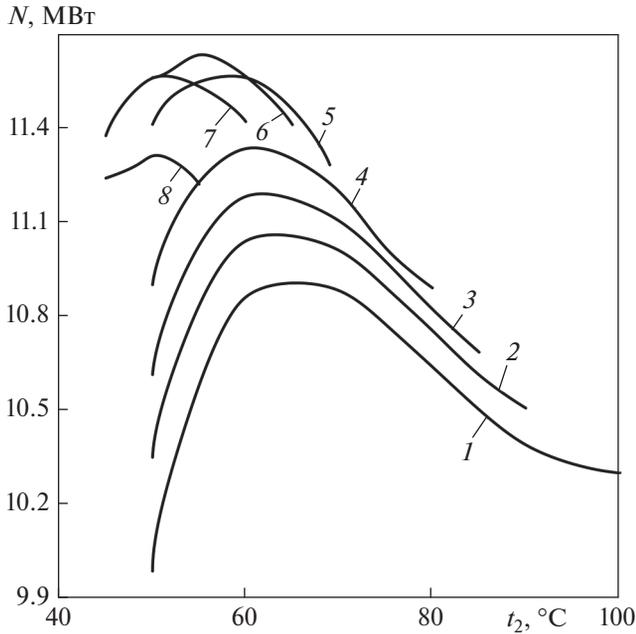


Рис. 7. Зависимость мощности нетто БЭК, использующего тепло геотермального теплоносителя с температурой 120°C, состоящего из трех каскадов, от температуры геотермального теплоносителя на выходе из первого t_1 и второго t_2 каскада БЭ при использовании в качестве рабочего тела в трех каскадах вещества R-3110. Мощность при t_1 , °C: 1 – 100; 2 – 90; 3 – 85; 4 – 80; 5 – 70; 6 – 65; 7 – 60; 8 – 55

температура на выходе из второго контура составляет 100°C, то мощность энергокомплекса равняется 10.3 МВт, при температуре 50°C мощность минимальна (около 10 МВт).

Расчетное поле значений удельного расхода исходного геотермального теплоносителя (нетто) в зависимости от его температуры после первого и второго каскадов для трехкаскадной схемы при использовании в качестве рабочего тела во всех каскадах R-3110 представлено на рис. 8. Из этой диаграммы видно, что минимальное значение удельного расхода (нетто) однофазного геотермального теплоносителя составляет 47.4 (кг/с)/МВт, что соответствует значениям температуры геотермального теплоносителя на выходе из первого каскада 65°C и на выходе из второго каскада 55°C. Имеются две зоны наибольших значений удельного расхода исходного геотермального теплоносителя, где его значение достигает 55.0 (кг/с)/МВт.

Как правило, основной оптимизационной задачей проектирования геотермальных энергоблоков является достижение наибольшей мощности при минимальном удельном расходе теплоносителя. Результаты расчетных исследований свидетельствуют о том, что одновременное достижение оптимальных значений этих параметров для двух- и трехкаскадных энергоблоков невозможно. Поэтому при разработке мультикаскадных БЭК за-

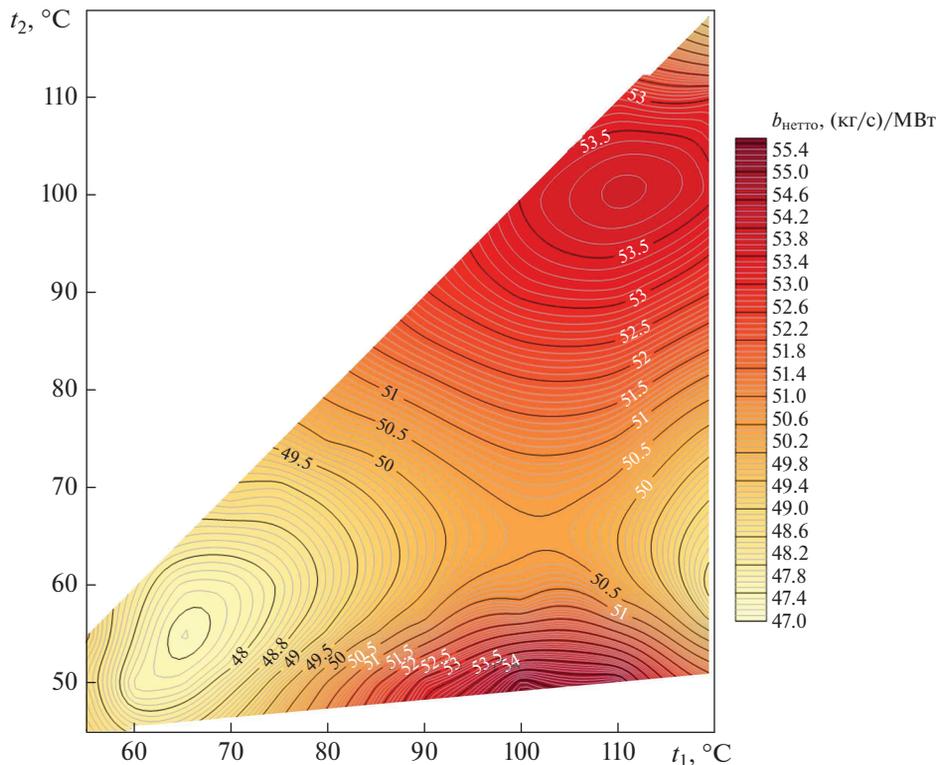


Рис. 8. Зависимость удельного расхода (нетто) $b_{\text{нетто}}$, геотермального теплоносителя с температурой 120°C от его температуры после первого t_1 и второго t_2 каскадов при использовании в качестве рабочего тела в трех каскадах вещества R-3110

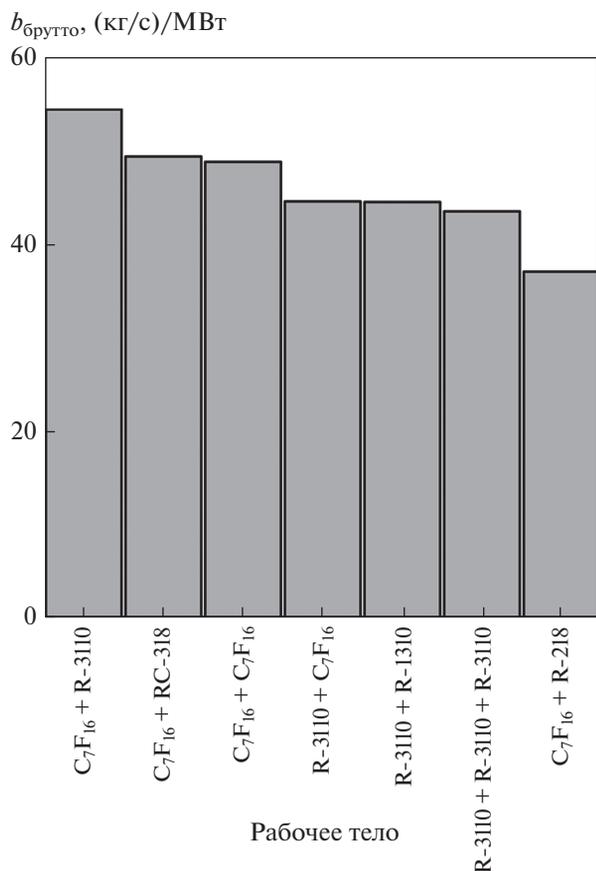


Рис. 9. Гистограмма расчетных значений удельного расхода (брутто) $b_{\text{брутто}}$ геотермального теплоносителя с температурой 120°C для различных рабочих тел, используемых в БЭК

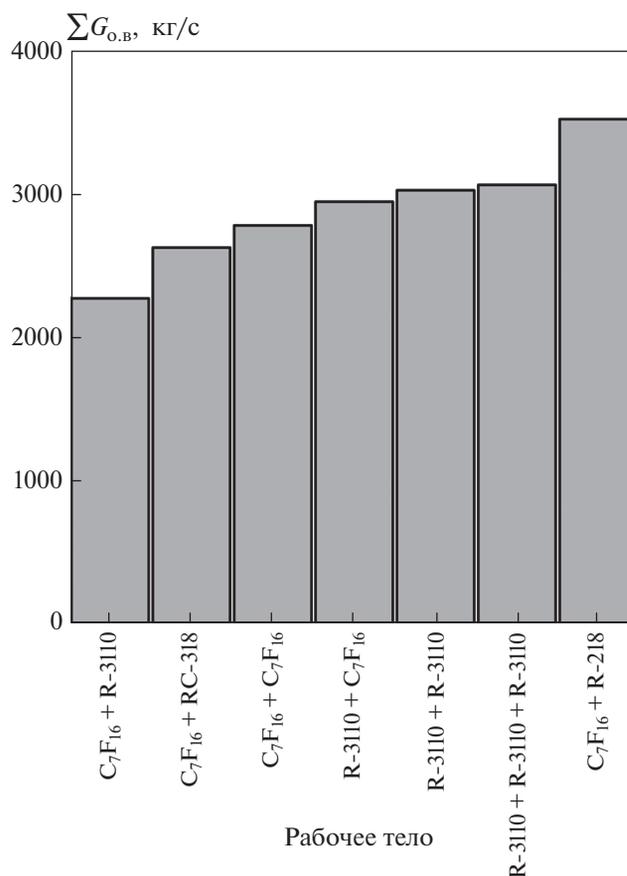


Рис. 10. Гистограмма расчетных значений расхода охлаждающей воды $\sum G_{\text{о.в}}$ при использовании различных органических веществ в БЭК при температуре геотермального теплоносителя на входе 120°C

казчику необходимо определить приоритеты для принятия компромиссного решения.

На рис. 9 представлена гистограмма, демонстрирующая влияние выбора рабочего тела на удельный расход геотермального теплоносителя в двух- и трехкаскадных БЭК. Минимальное расчетное значение удельного расхода геотермального теплоносителя (брутто), равное 37.0 (кг/с)/МВт, достигается в двухкаскадном энергокомплексе при использовании в качестве рабочего тела в первом каскаде C_7F_{16} и во втором $R-218$ (см. рис. 9). Минимальное значение удельного расхода (нетто) геотермального теплоносителя, равное 47.4 (кг/с)/МВт, обеспечивает использование в качестве рабочего тела $R-3110$ во всех каскадах трехкаскадного энергокомплекса. В этом случае повышение эффективности утилизации геотермального теплоносителя составляет 6.1% .

Для бинарных технологий характерны значительные расходы охлаждающей воды и, как следствие, большие затраты на собственные нужды. Расчеты показали, что наибольший расход охла-

ждающей воды в исследуемых мультикаскадных схемах составляет 3519.3 кг/с при использовании C_7F_{16} и $R-218$ в качестве рабочих тел в первом и втором каскаде соответственно (рис. 10). Применение органических веществ C_7F_{16} и $R-3110$ в первом и втором контуре соответственно позволяет снизить расход охлаждающей воды по сравнению с вышеупомянутым вариантом на 36% , т.е. до 2250 кг/с.

Предварительная укрупненная оценка влияния на капитальные вложения и выработку электроэнергии при сооружении однокаскадного энергоблока и мультикаскадных БЭК была проведена на основе стоимостных показателей, представленных в [10]. В соответствии с этими данными удельная стоимость буровых работ и обустройства скважин ориентировочно равна 100.5 тыс. дол. (здесь и далее стоимость работ и выработанной электроэнергии приводится в долларах США) за 1.0 л/с геотермального теплоносителя. Стоимость 1 кВт установленной мощности однокаскадного бинарного энергоблока составляет 3500 дол., двух-

каскадного – 4200 дол., а трехкаскадного может быть оценена в 4700 дол.

Расчеты, выполненные с учетом буровых работ, обустройства скважин и стоимости бинарных энергоблоков, показали, что при температуре геотермального теплоносителя 120°C ориентировочная стоимость геотермальной электростанции с однокаскадным бинарным энергоблоком на рабочем теле R32 (мощностью брутто 15.0 МВт) будет равна 91.4 млн дол., а с двухкаскадным БЭК на рабочем теле R32 в двух контурах (мощностью брутто 16.7 МВт) – 105.4 млн дол., с трехкаскадным БЭК на рабочем теле R600 (мощностью брутто 136 МВт) – 103.0 млн дол. Из этого следует, что при переходе от однокаскадной к двухкаскадной схеме капитальные вложения в сооружение геотермальной электростанции вырастут на 15.3%, а выработка электроэнергии при этом увеличится на 13.7%. При переходе от однокаскадной к трехкаскадной схеме капитальные вложения в строительство геотермальной электростанции вырастут на 12.6%, а выработка электроэнергии увеличится на 22.4%.

ВЫВОДЫ

1. Определенные с помощью оптимизационного математического моделирования органические низкокипящие вещества, применяемые в качестве теплоносителей, а также значения температуры геотермальной среды в каскадах, позволяющие достичь максимальной мощности и минимального удельного расхода флюида, могут быть использованы при разработке мультикаскадных бинарных энергокомплексов с температурой геотермального теплоносителя 120°C.

2. Применение трехкаскадной схемы при использовании геотермального теплоносителя с температурой 120°C (когда во всех трех контурах используется R-600) может обеспечить прирост передаваемого в бинарный цикл тепла на 36.5% по сравнению с однокаскадной схемой. При использовании геотермального теплоносителя с температурой 180°C прирост передаваемого тепла составил 15.0%.

3. Минимальные значения удельного расхода геотермального теплоносителя с температурой 120°C (нетто и брутто) в трехкаскадной схеме достигаются при использовании в качестве рабочего тела первого, второго и третьего каскадов вещества R-600 и составляют 44.6 и 42.7 (кг/с)/МВт соответственно.

4. Удельный расход геотермального теплоносителя с температурой 120°C в двухкаскадной схеме более “чувствителен” к выбору нетоксичных, пожаро- и взрывобезопасных веществ (измене-

ние может достигать 51%), чем расход геотермального теплоносителя с температурой 180°C (изменение не превышает 15.5%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gnutek Z., Bryszewska-Mazurek A.** The thermodynamic analysis of multicycle ORC engine// *Energy*. 2001. V. 26. Is. 12. P. 1075–1082. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00070-6)
2. **Heberle F., Jahrfeld T., Brüggemann D.** Thermodynamic analysis of double-stage Organic Rankine Cycles for low-enthalpy sources based on a case study for 5.5 MWe power plant Kirchstockach (Germany) // *Proc. of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.*
3. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180°C) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 4. С. 31–40. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030109>
4. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой подогрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // *Теплоэнергетика*. 2019. № 11. С. 63–71. <https://doi.org/10.1134/S0040363619110067>
5. **DiPippo R.** *Geothermal power plants. Principles, applications, case studies and environmental impact.* 4th ed. Elsevier Ltd, 2015. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02885-7>
6. **Бутузов В.А., Томаров Г.В.** Геотермальная энергетика Камчатки // *Теплоэнергетика*. 2020. № 11. С. 50–63. <https://doi.org/10.1134/S0040363620110041>
7. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Современная геотермальная энергетика: геотермальные электростанции с бинарным циклом // *Теплоэнергетика*. 2017. № 4. С. 3–12. <https://doi.org/10.1134/S0040363617040099>
8. **A review of geothermal energy-driven hydrogen production systems / M. Mahmoud, M. Ramadan, S. Nather, K. Pullen, M.A. Abdelkareem, A.-G. Olabi // Therm. Sci. Eng. Prog.** 2021. V. 22. P. 100854. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100854>
9. **Yohanis Y.G., Popel O.S., Frid S.E.** A simplified method of calculating heat flow through a two-phase heat exchanger // *Appl. Therm. Eng.* 2005. V. 25, Is. 14–15. P. 2321–2329. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.12.011>
10. **Geothermal binary power plants. Preliminary study of low temperature utilization, cost estimates and energy cost.** Iceland, Reykjavik: Verkis Consulting Engineers, 2014.

Multistage Organic Rankine Cycles: Utilization of Medium Temperature (120°C) Geothermal Fluid

G. V. Tomarov^{a, *} and A. A. Shipkov^{a, *}

^a *ООО Geoterm-M, Moscow, 111250 Russia*

^{*} *e-mail: geotom.m@gmail.com*

Abstract—With a growth in the scales on which binary cycle (ORC) power units are constructed, new technical solutions aimed at improving the efficiency of binary technologies are searched for. To this end, the possibility of using multistage ORCs based on the principle of incremental (staged) conversion of geothermal fluid energy is also studied. In view of the fact that low-temperature geothermal resources dominate around the world (the fluid outlet temperature is lower than 130°C in up to 60% of all geothermal fields), the optimization calculated studies of two- and three-stage ORCs were carried out for a source geothermal fluid with a temperature of 120°C. The article presents the results of studying the effect that the choice of low-boiling organic substances and the geothermal fluid temperature in the stages have on achieving the cycle maximal power output and minimal fluid mass flowrate. The technical characteristics of two- and three-stage ORCs are compared with those of a conventional single-loop ORC power unit in the case of using various nontoxic and fire- and explosion-safe organic substances. It is shown that, by applying a three-stage process circuit with R-600 working fluid in all loops and using geothermal fluid with a temperature of 120°C, it is possible to increase the amount of heat transferred to the binary cycle by 36.5% in comparison with the single-stage process circuit. In accordance with the previously performed calculations, the growth of heat transferred to the binary cycle in the case of using geothermal fluid with a temperature of 180°C amounted to 15.0%. It has been found that the minimal (net and gross) mass flowrates of geothermal fluid with a temperature of 120°C in the three-stage process circuit are achieved in the case of using R-600 substance as working fluid in the first, second, and third stages and make 44.6 and 42.7 (kg/s)/MW, respectively. The obtained results can be used in the development and designing of multistage ORCs with the geothermal fluid temperature equal to 120°C.

Keywords: low-temperature geothermal fluid, binary (ORC) power units, organic working fluid, multistage ORCs, mass flowrate, power